

パンタグラフと電車線の スムーズな接触を実現する



天野 佑基
Yuki Amano
鉄道力学研究部
集電力学研究室
研究員



小林 樹幸
Shigeyuki Kobayashi
鉄道力学研究部
集電力学研究室
主任研究員

はじめに

現在の電気鉄道では、**トロリー線**とパンタグラフが接触することによって電気を車両に供給しています。このプロセスを集電と呼びます。そして、走行中はパンタグラフが振動しながらトロリー線に接触するため、トロリー線のしゅう動面に波状の摩耗（波状摩耗）が発生する場合があります¹⁾。この波状摩耗が発生すると、スムーズな集電が困難になるため、トロリー線を通常時よりも早く交換する必要が生じます。波状摩耗が発生する要因の一つに、低速走行時のパンタグラフの**摩擦振動**があります。この摩擦振動の発生メカニズムを解明できれば、防止対策を講じることができ、トロリー線の交換周期を伸ばすなどの低コスト化につながります。本記事では、パンタグラフの摩擦振動が発生するメカニズムと防止対策について紹介します。

摩擦振動の特徴と課題

パンタグラフの摩擦振動は、在来線および新幹線の低速区間において生じることが報告されています¹⁾²⁾。特に、新幹線における摩擦振動は東海道新幹線開業時から認識されている課題¹⁾で、低速走行区間において摩擦力が大きい条件³⁾において発生すると考えられています。また、摩擦振動に関しては多くの分野でさまざまなメカニズムが報告されています⁴⁾。摩擦振動の研究で難しい点は、摩擦力が働いている境界面の情報を直接測定できない点です。これにより、どのメカニズムで生じているのかを見極めることが困難となります。そのため、メカニズムを解明する際には、実験およびシミュレーションの両者を活用し、境界面の情報以外の間接的な情報から、メカニズムを一つずつ検証していく必要があります。このような難易度の高さが理由で、この摩擦振動のメカニズムは未解明のままとなっていました。

実験による摩擦振動の再現

メカニズムの解明には、その現象を実験的に再現することが欠かせません。そこで、鉄道総研が有する高速パンタグラフ試験装置⁵⁾を用いて摩擦振動を再現することにしました（**図1**）。この装置では、円盤の回転によって車両の走行

☞ トロリー線

パンタグラフと接触およびしゅう動して、負荷電流を供給する電線のことです。

☞ 摩擦振動

摩擦力と物体の運動が相互作用することで引き起こされる種々の振動のことです。

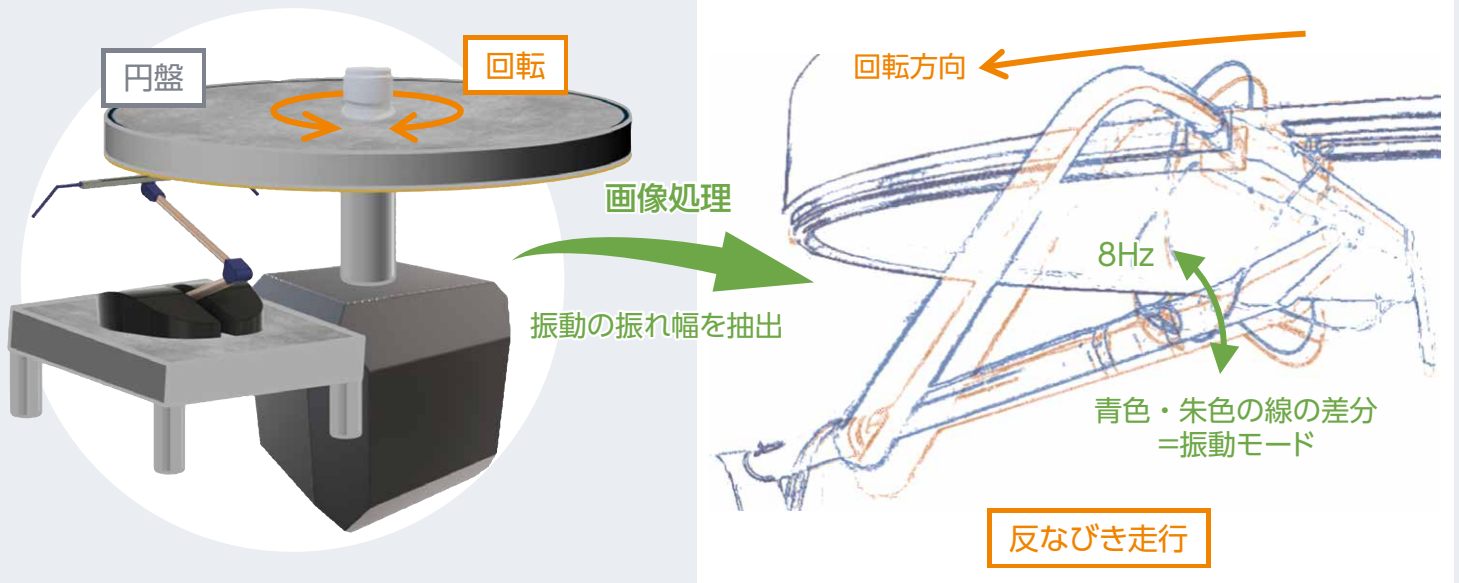


図1 高速パンタグラフ試験装置で再現した摩擦振動の様子

を模擬します。そして、しゅう動条件を工夫することにより、摩擦振動を再現することができました⁶⁾。摩擦振動を撮影した動画に対して画像処理を適用し、振動の振れ幅を抽出した結果を図1の右側に示します。図から、反なびき走行においてパンタグラフの枠が揺れる様子が見て取れます。また、この再現試験で得られた各種データから、摩擦振動のメカニズムを2つのジャンルに絞り込むことができました⁶⁾。

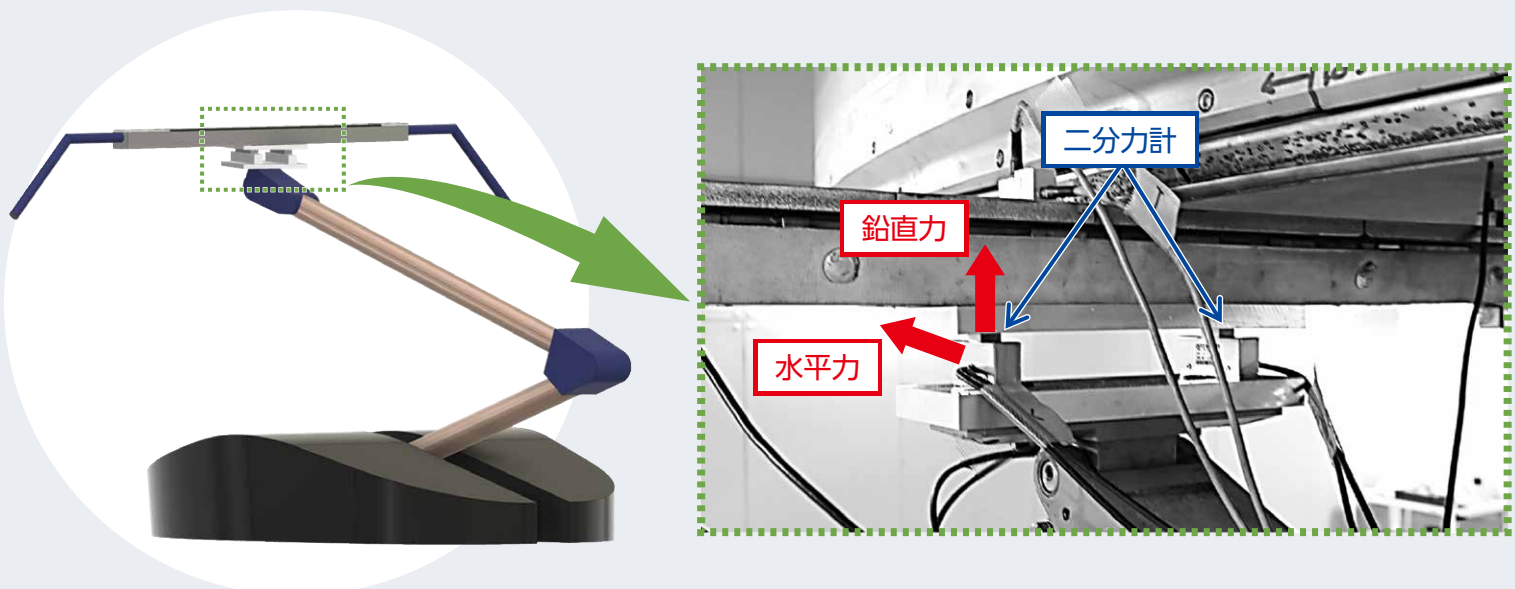
メカニズムのさらなる絞り込みには、摩擦係数

および、しゅう動部材の迎角が摩擦振動に及ぼす感度を調べる必要があります。実機パンタグラフにおける摩擦係数の測定に関しては、今までほとんど実施されていませんでした。そこで、実機パンタグラフに**二分力計**を挿入し、摩擦係数を推定する手法を提案しました(図2参照)。

二分力計

物体に作用する力を直交する二方向に分解し、それぞれの方向における力の大きさを測定できるセンサーです。

図2 二分力計を用いた摩擦係数の推定手法



提案手法では、二分力計から得られる鉛直力および水平力の値を用いて、摩擦係数を推定します⁶⁾。また、迎角に関しては、傾斜計(図3の上側)を用いて測定します。摩擦係数および迎角を変更した際の摩擦振動の発生状況を図3の下側に示します。なお、図3の摩擦係数の正負は

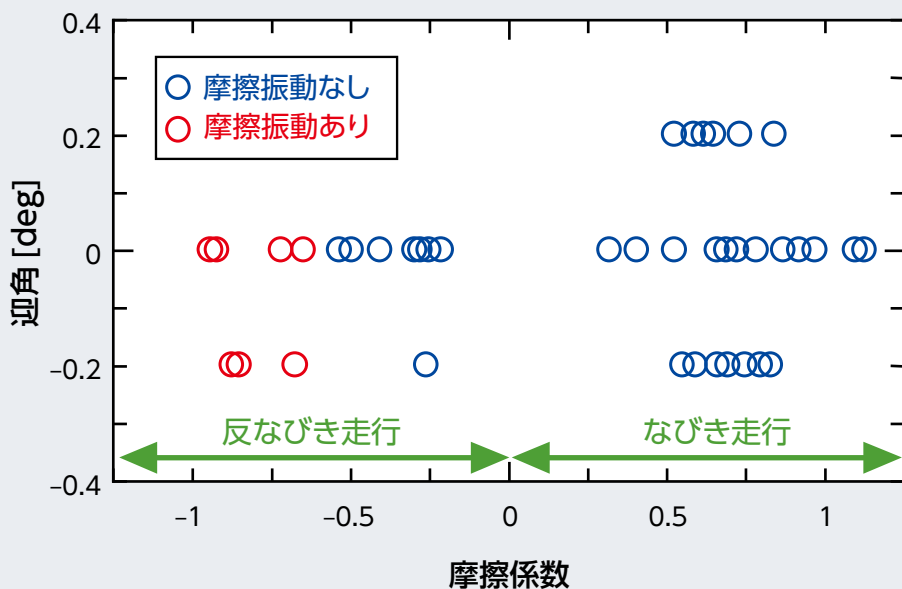
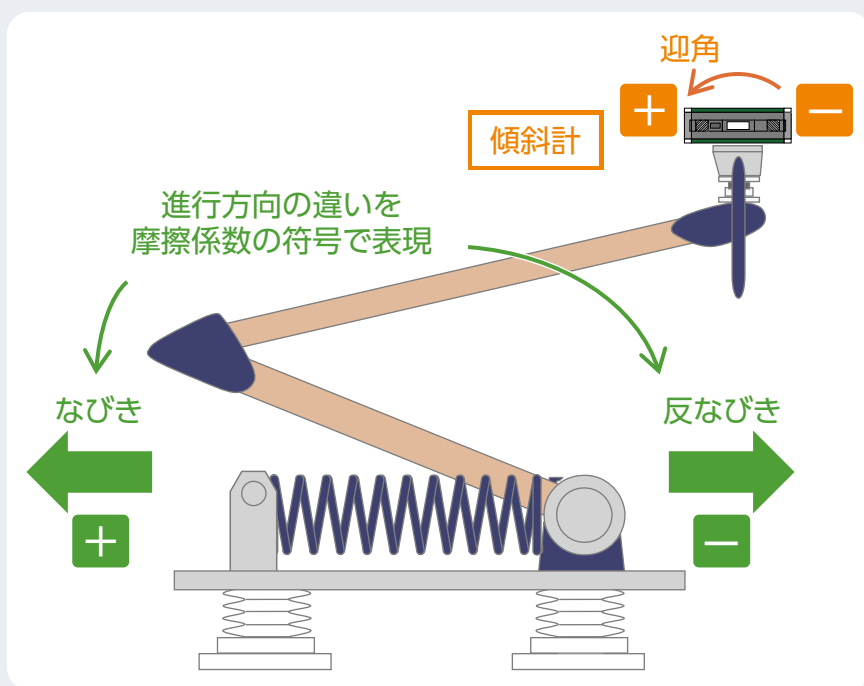
走行方向を表現しています。図より、反なびき走行において摩擦係数が約0.7を超えると摩擦振動が生じること、迎角に対する感度は小さいことが見て取れます。通常時の摩擦係数は0.3程度であるため、摩擦振動は摩擦係数が非常に大きくなる特殊な状況でのみ発生することがわ

かります。また、摩擦係数や迎角の感度からこの摩擦振動のメカニズムを、モード連成という一つのジャンルに絞り込むことができました⁶⁾。

モード連成について

本節では、振動モードおよびモード連成について紹介します。機械が振動する際には、その機械の動特性によって決まる特定の形でしか振動できません。この形を振動モードとよびます。一般的な機械には複数の振動モードが存在し、複数の振動モードが混ざった形で振動します。この振動モードを調べることは機械の本質的な特性を調べることに直結します。このようなプロセスをモード解析と呼びます。そして、摩擦などの特殊な力が作用する場合には、複数の振動モードが相互に影響を及ぼしあい、大きな振動が生じることがあります。このようなモードの相互作用をモード連成と呼びます。

図3 迎角および摩擦係数に対する感度



シミュレーションを用いた メカニズムの解明

実験からこの摩擦振動のメカニズムはモード連成であると推測できましたが、その推測は本当に正しいのか、なぜモードが連成するのかといった疑問に答えるためにはシミュレーションを用いる必要があります。そこで、パンタグラフの高精度モデル⁶⁾を構築しました(図4)。

また、各種実験から摩擦をクーロン摩擦でモデル化してよいということが推測されます。これにより、前述のモード解析を適用できます。高精度モデルに対してモード解析を適用した結果を図5および図6に示します。図5は迎角および摩擦係数を変更した際の摩擦振動の発生状況を表し、図3と傾向が一致していることが見て取れます。また、図6はモード解析より得られた摩擦振動の振動モードを表しており、図1と同様の枠の揺れが表れていることがわかります。これらより、シミュレーションは実験結果と高い精度で一致しており、この摩擦振動のメカニズムはやはりモード連成であると確かめることができました。

次に、なぜモードが連成するのか、なぜ反なびき走行のみ摩擦振動が生じるのか、について説明します。モード連成は2つの振動モードの形が非常に近くなることで生じることが知られ

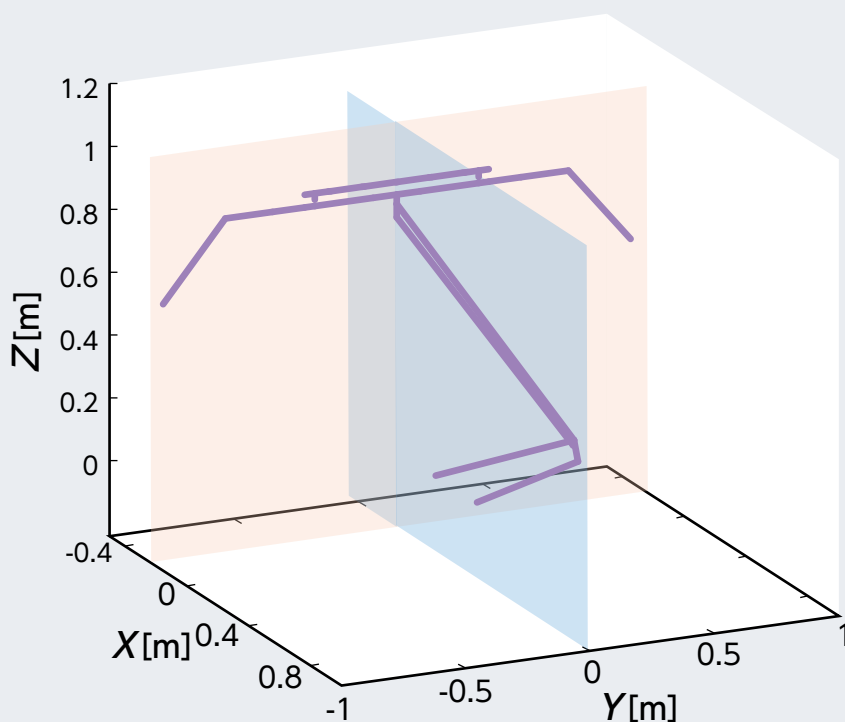
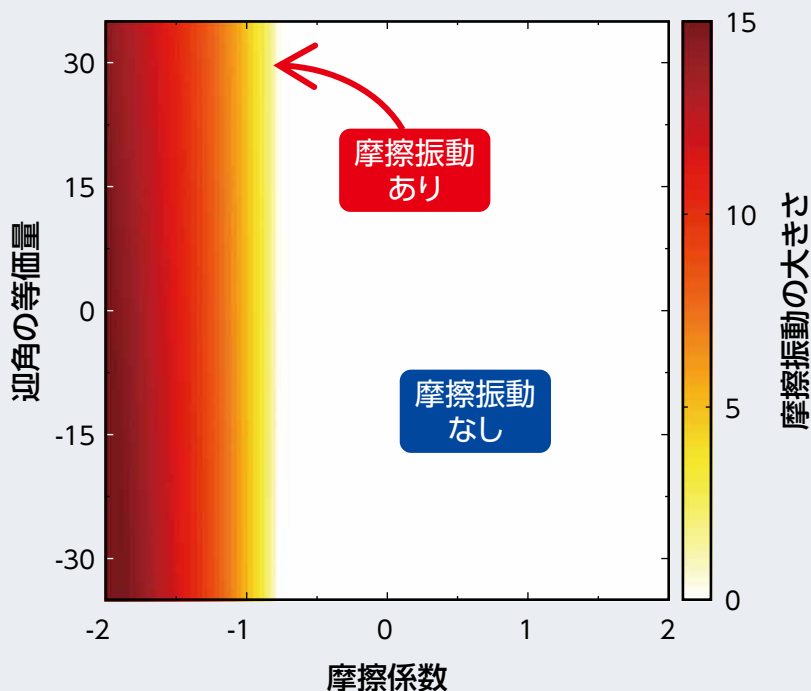


図4 パンタグラフの高精度モデル

図5 モデルより計算した感度



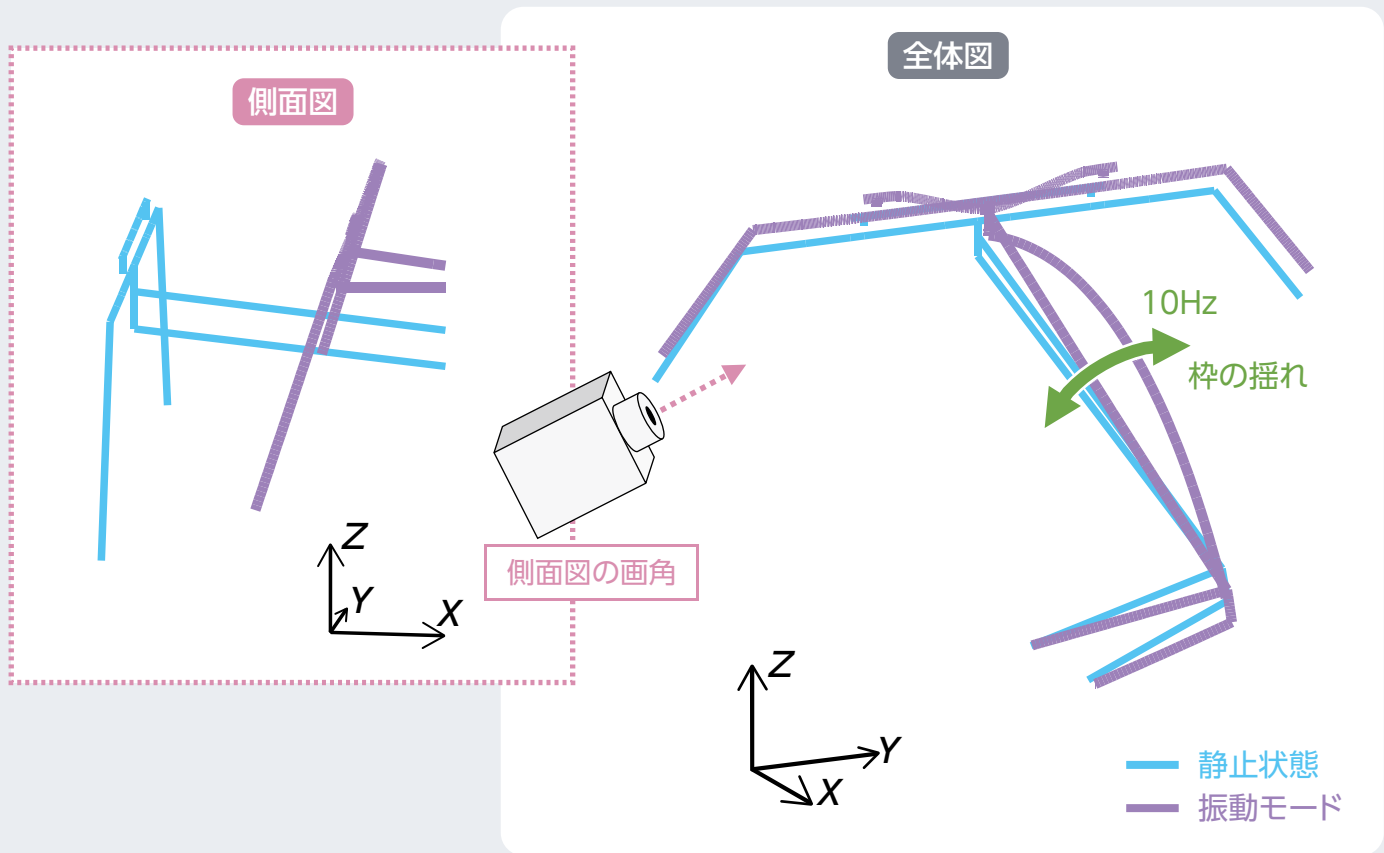


図6 モデルより計算した摩擦振動の振動モード

ています。よって、摩擦の有無によって、連成している振動モードがどう変化するかを調べることにより、モード連成の理由を推測することができます。そして、現状の測定および推定技術では、このような解析を実験的に行うことは困難であり、シミュレーションを行う意義がここにあります。

モード連成の概念図を図7に示します。図7の左側は摩擦が作用していないときの振動モード、右側は左側に示した各モード（モード1・モード2）が反なびき走行時の摩擦力の作用により変化した様子を示しています。図7の左側ではモード1およびモード2の振動モードは似通っていませんが、右側では振動モードが非常に似通っていることが見て取れます。これは、

図7の中央に示すように、反なびき走行時の摩擦力およびモーメントの作用が原因であると推測されます。逆になびき走行時には、摩擦力が逆方向に作用するため、振動モードの形はより乖離^{かい}します。これが、反なびき走行時のみ摩擦振動が生じる理由だと考えられます。

対策の考え方

解明されたメカニズムから、2つの振動モードが連成しないような対策を施せばよいことがわかります。そして、振動モードは機械の特性によって生じるため、機械の特性を適切に調整すれば、モードの連成を抑制することが可能です。例えば、パンタグラフ最下部の軸の支持剛性や、しゅう動部材の支持構造を変更するなど

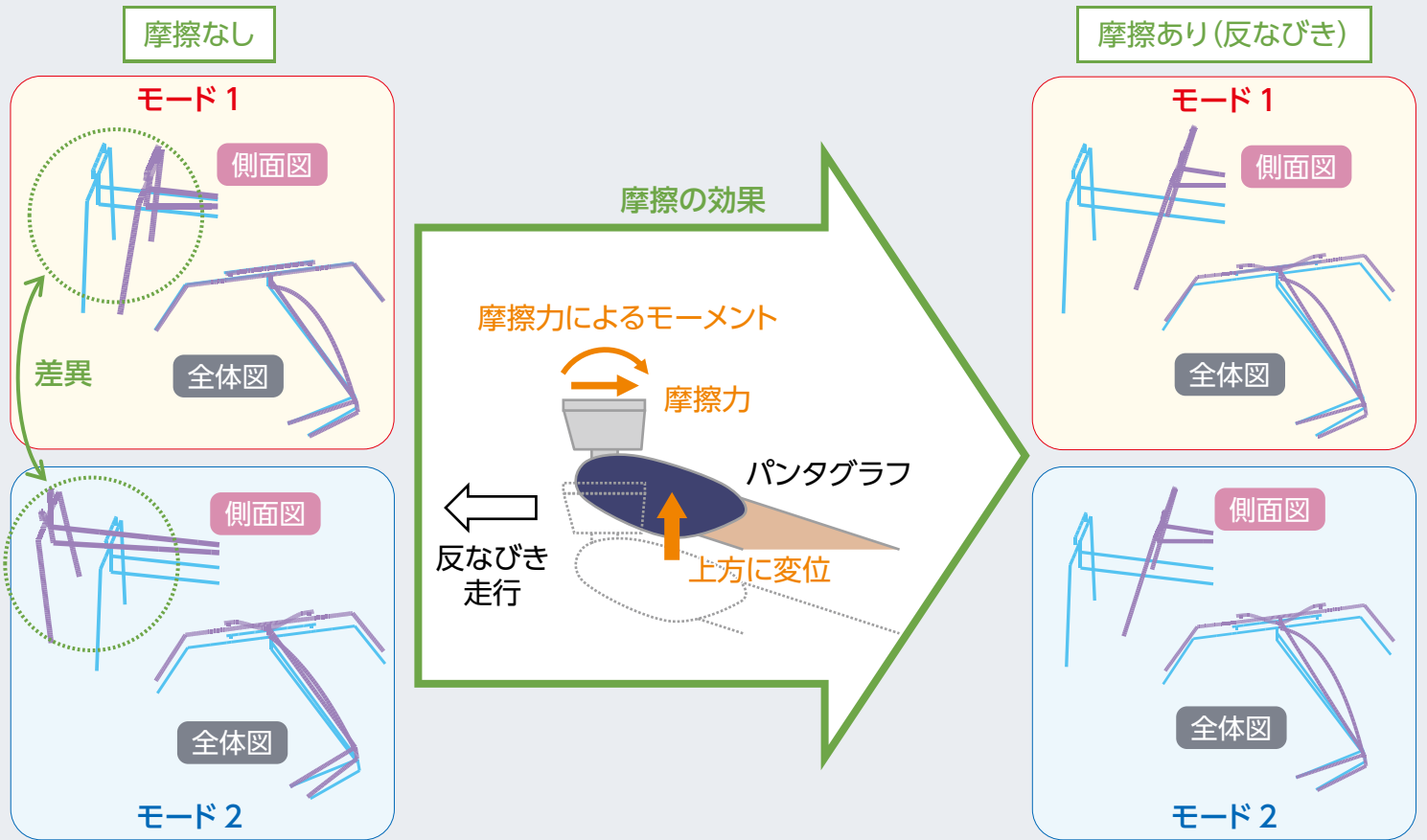


図7 モード連成の概念図

の対策が考えられます。両者ともシミュレーションを用いてその効果を確認しており⁶⁾、後者に関しては実験でもその効果を確認しました⁵⁾。

おわりに

ここでは新幹線パンタグラフに生じる摩擦振動のメカニズムと対策の考え方を紹介しました。これらの研究はトロリー線保守のさらなる低コスト化に貢献できると考えられます。今後は具体的な防止対策に関して研究を進め、よりスムーズな接触の実現に取り組む所存です。RRR

文献

- 1) 有本弘, 岩瀬勝: 電車線の集電 [III], 電気鉄道, Vol.28, No.3, pp.35-38, 1974
- 2) 坂本真彦, 加来洋成, 鈴木優太: ED76形式パンタグラフのピッチング対策, R&m, No.5, pp.55-59, 2012
- 3) 根本公紀, 久保田喜雄: 銅合金トロリー線と鉄系焼結合金すり板の摩擦・摩耗に及ぼすしゅう動速度の影響, 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), No.S7-4-2, pp.570-573, 2019
- 4) Yutaka Nakano, Katsunori Cho, Takamasa Hase, Yuki Matsumura, Hiroki Takahara: Experimental study of friction-induced noise generated from the printer fuser assembly (Generation mechanism and countermeasures), Mechanical Engineering Journal, Vol.11, No.2, 2024
- 5) 小山達弥: 高速パンタグラフ試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.9, pp.5-10, 2021
- 6) Yuki Amano, Shigeyuki Kobayashi, Hiroshi Yabuno, Yoshitaka Yamashita, Hiroki Mori: Mechanism and suppression of friction-induced vibration in catenary-pantograph system, <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09802-6>, 2024